

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ЦЕПИ КАСКАДНО-СИНХРОНИЗИРУЕМЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

*Проведены исследования динамических свойств цепи последовательно соединенных через дискретные компоненты системы фазовой автоподстройки частоты генераторов, функционирующих в условиях комбинированных воздействий.*

Появление цифровых технологий передачи данных, таких как SDH/SONET, потребовало срочного принятия мер по созданию средств синхронизации сетей. Для обеспечения каждого узла сети надежным синхросигналом используются сети синхронизации, в основе которых лежит цепь последовательно соединенных синхронизируемых генераторов. В таких сетях синхросигнал, генерируемый опорным генератором (первичный эталонный генератор (ПЭГ), в качестве которого применяют, как правило, различные стандарты частоты), используется в ведомых устройствах синхронизации — сетевых элементах SEC, вторичных задающих генераторах (ВЗГ) — для генерации синхросигнала с помощью фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (рис. 1). Различные источники шума искажают передаваемый по сети синхросигнал, что может повлечь за собой выход ведомых генераторов из состояния синхронизма. Это приводит к проскальзываниям в эластичной памяти устройств загрузки (выгрузки) компонентных потоков в групповой сигнал (из него) — мультиплексоров и демультимплексоров SDH; передаваемые по сети данные могут быть потеряны.

В настоящее время вопросы, касающиеся свойств каскадно синхронизируемых цепей, не исследованы в должной мере. Многие исследования ограничиваются линейными моделями цепи, справедливыми только в условиях малых воздействий на ее звенья. Исследования же нелинейных свойств ограничены изучением поведения одного кольца системы фазовой синхронизации (СФС) при наличии аддитивного

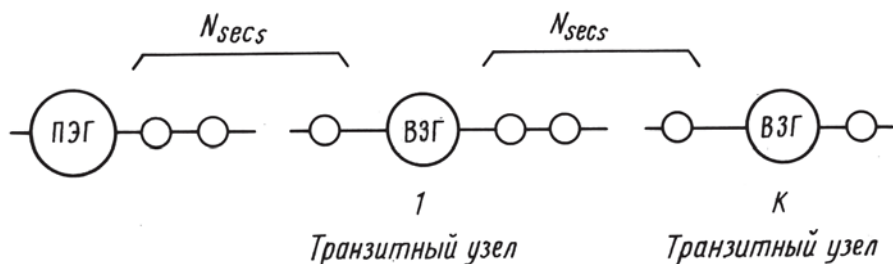


Рис. 1. Структурная схема сети синхронизации

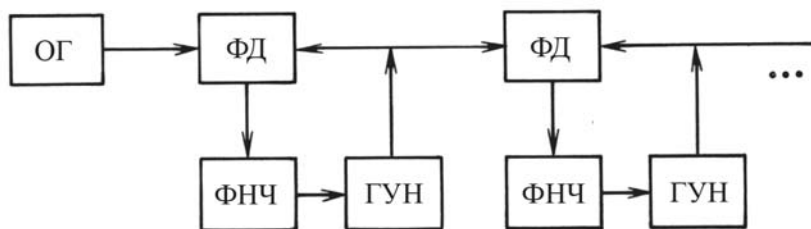


Рис. 2. Структурная схема цепи каскадно синхронизируемых генераторов

белого гауссова шума. В настоящее время, когда для передачи данных все чаще используются волоконно-оптические системы, этот вид шумового воздействия отошел на второй план и большое значение приобрело поведение кольца в условиях флуктуаций фазы (частоты).

Структурная схема цепи генераторов, функционирующих в условиях комбинированных воздействий, изображена на рис. 2.

На рис. 2 обозначено: ОГ — опорный генератор, ФД — фазовый детектор, ФНЧ — фильтр нижних частот, ГУН — генератор, управляемый напряжением, он же — перестраиваемый генератор — ПГ. К комбинированным воздействиям в данном контексте относится совокупность трех независимых воздействий: входного аддитивного шума, входного фазового шума и фазового шума, вносимого перестраиваемым генератором. Каждое звено цепи представляет собой кольцо импульсной СФС, функциональная схема которой приведена на рис. 3.

В схеме на рис. 3 введены следующие обозначения:  $\eta_k$  — входной частотный шум,  $\alpha n_k$  — входной аддитивный шум, пересчитанный на выход фазового детектора, где  $\alpha$  — коэффициент пересчета аддитивного шума в фазовый — выражается через характеристики входного сигнала и параметры кольца [1];  $\xi_k$  — собственный частотный шум ПГ;  $S_u$  — крутизна ПГ;  $F(\varphi)$  — дискриминационная характеристика ФД;

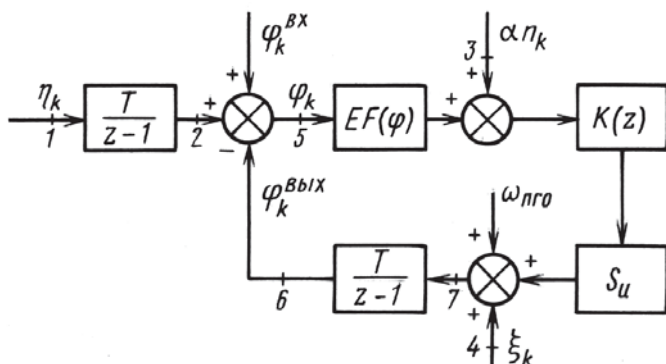


Рис. 3. Функциональная схема синхронизируемого генератора на основе дискретного кольца ФАПЧ, работающего в условиях комбинированных воздействий

$E$  — крутизна дискриминационной характеристики ФД;  $T$  — тактовый период;  $K(z)$  — передаточная функция ФНЧ. Большую популярность получили фильтры, реализованные в виде интегратора с форсированием. Одним из преимуществ таких фильтров является повышение устойчивости системы в целом. Коэффициент передачи фильтра имеет вид

$$K(z) = \frac{T}{z-d} + m, \quad (1)$$

где  $T$ ,  $d$  — некоторые постоянные, характеризующие интегратор;  $m$  — коэффициент форсирования.

Интегратор на входе необходим для преобразования входного частотного шума в фазовый. Использование частотной модели шума обусловлено необходимостью сведения математической модели системы к классу марковских.

**Математические модели звена ИФАПЧ.** Рассмотрим три модели.

1. *Математическая модель кольца в форме стохастических разностных уравнений.* Кольцо второго порядка, содержащее фильтр в цепи управления, характеристика которого имеет вид (1), описывается следующей системой разностных уравнений [1]:

$$\begin{cases} \varphi_{k+1} = \varphi_k + x_k - \beta_1 F(\varphi_k) + \Psi_k - \alpha_1 n_k; \\ x_{k+1} = dx_k - (\beta_1 d + \beta_0) F(\varphi_k) - (\alpha_1 d + \alpha_0) n_k + T(1-d)\gamma, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\gamma$  — начальная частотная расстройка;  $\beta_1 = TES_u m$ ,  $\beta_0 = TES_u(T - md)$ ;  $\alpha_1 = TS_u \alpha m$ ,  $\alpha_0 = TS_u \alpha(T - md)$ ;  $\Psi_k = T(\eta_k - \xi_k)$  — случайный процесс. В связи с некоррелированностью процессов  $\eta$  и  $\xi$  его параметры будут равны  $m_\Psi = T(m_\eta - m_\xi)$  и  $\sigma_\Psi^2 = T^2(\sigma_\eta^2 + \sigma_\xi^2)$ . Переменная  $x$  в данной системе не имеет физического смысла, она введена искусственно в целях сведения разностного уравнения второго порядка к системе уравнений первого порядка.

Координаты вектора состояния системы на  $(k+1)$ -м шаге зависят только от координат вектора состояния на  $k$ -м шаге, поэтому система является марковской — описать ее можно с помощью уравнения Колмогорова–Чепмена, позволяющего отслеживать динамику плотности распределения вероятностей (ПРВ) на текущем шаге через ПРВ на предыдущем.

2. *Математическая модель звена в виде уравнения Колмогорова–Чепмена.* В общем виде уравнение Колмогорова–Чепмена выглядит следующим образом:

$$W_{k+1}(\vec{Q}) = \int_{-\infty}^{\infty} q(\vec{Q} | \vec{Z}) W_k(\vec{Z}) d\vec{Z}, \quad (3)$$

где  $\vec{Q}$  – вектор состояния системы на  $(k + 1)$ -м шаге;  $\vec{Z}$  – вектор состояния системы на  $k$ -м шаге;  $W_k(\vec{Z})$  – плотность вероятности фазовой ошибки на  $k$ -м шаге;  $q(\vec{Q} | \vec{Z})$  – условная ПРВ перехода из точки  $(\varphi_k, x_k)^T$  в точку  $(\varphi_{k+1}, x_{k+1})^T$ . Для кольца второго порядка условная ПРВ описывается следующим выражением:

$$q(\vec{Q} | \vec{Z}) = q(Q_1, Q_2 | Z_1, Z_2) = q(Q_1 | Q_2, Z_1, Z_2)q(Q_2 | Z_1, Z_2) \quad (4)$$

Из полученной системы стохастических уравнений имеем

$$q(Q_2 | Z_1, Z_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\alpha_1 d + \alpha_0)^2 \sigma_n^2}} \times \exp\left(-\frac{(dZ_2 - (\beta_1 d + \beta_0)F(Z_1) - Q_2 + T(1-d)\gamma)^2}{2(\alpha_1 d + \alpha_0)^2 \sigma_n^2}\right). \quad (5)$$

В связи с периодичностью фазового пространства можно записать

$$q(Q_1 | Q_2, Z_1, Z_2) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{q}(Q_1 + 2\pi n | Q_2, Z_1, Z_2). \quad (6)$$

Согласно системе уравнений (2),

$$\tilde{q}(Q_1 | Q_2, Z_1, Z_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\Psi^2}} \times \exp\left(-\frac{(Q_1 - Z_1 - \lambda_0 Z_2 - \lambda_1 Q_2 - \lambda_1 T(1-d)\gamma)^2}{2\sigma_\Psi^2}\right), \quad (7)$$

где  $\lambda_i = \frac{a_i}{a_1 d + a_0}$ .

3. Математическая модель звена в форме расширенного векторного уравнения Колмогорова–Чепмена. Уравнение Колмогорова–Чепмена, полученное в п. 2, позволяет определить совместную ПРВ  $W_k(\varphi, x)$  на  $k$ -м шаге. Для определения статистических характеристик процессов на выходе кольца необходимо добавить в систему (2) еще одно уравнение:

$$\varphi_{k+1}^{\text{ш.БХ}} = \varphi_k^{\text{ш.БХ}} + T\eta_k. \quad (8)$$

Тогда выходную фазу можно найти как  $\varphi_k^{\text{ш.БВХ}} = \varphi_k^{\text{ш.БХ}} - \varphi_k$ . Здесь  $\varphi_k^{\text{ш.БХ}}$  – шумовой процесс на входе системы, получаемый в результате интегрирования процесса  $\eta_k$ .

Расширенная система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} \varphi_{k+1} = \varphi_k + x_k - \beta_1 \sin \varphi_k + T(\eta_k - \xi_k) - \alpha_1 n_k; \\ x_{k+1} = dx_k - (\beta_1 d + \beta_0) \sin \varphi_k - (\alpha_1 d + \alpha_0) n_k + T(1-d)\gamma; \\ \varphi_{k+1}^{\text{ш.БХ}} = \varphi_k^{\text{ш.БХ}} + T\eta_k. \end{cases} \quad (9)$$

Расширенное векторное уравнение Колмогорова–Чепмена в терминах координат будет иметь вид

$$W_{k+1}(Q_1, Q_2, Q_3) = \int_{-\infty}^{\infty} q(Q_1, Q_2, Q_3 | Z_1, Z_2, Z_3) W_k(Z_1, Z_2, Z_3) dZ_1 dZ_2 dZ_3. \quad (10)$$

Согласно системе уравнений (9), условные ПРВ определяются следующими выражениями:

$$q(Q_3 | Z_1, Z_2, Z_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\eta^2}} \exp\left(-\frac{(Q_3 - Z_3)^2}{2T^2\sigma_\eta^2}\right); \quad (11)$$

$$q(Q_2 | Q_3, Z_1, Z_2, Z_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\alpha_1 d + \alpha_0)^2\sigma_n^2}} \times \exp\left(-\frac{(dZ_2 - Q_2 - (\beta_1 d + \beta_0) \sin Z_1 + T(1-d)\gamma)^2}{2(\alpha_1 d + \alpha_0)^2\sigma_n^2}\right); \quad (12)$$

$$q(Q_1 | Q_2, Q_3, Z_1, Z_2, Z_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi T^2\sigma_\xi^2}} \times \exp\left(-\frac{(Z_1 + \lambda_0 Z_2 - Z_3 + Q_3 + \lambda_1 Q_2 - Q_1 - \lambda_1 T(1-d)\gamma)^2}{2T^2\sigma_\xi^2}\right). \quad (13)$$

Необходимо произвести суммирование по всем состояниям:

$$\tilde{q}(Q_1 | Q_2, Q_3, Z_1, Z_2, Z_3) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(Q_1 + 2\pi n | Q_2, Q_3, Z_1, Z_2, Z_3). \quad (14)$$

Используя теорему об умножении вероятностей, получаем

$$q(Q_1, Q_2, Q_3 | Z_1, Z_2, Z_3) = \tilde{q}(Q_1 | Q_2, Q_3, Z_1, Z_2, Z_3) \times q(Q_2 | Q_3, Z_1, Z_2, Z_3) q(Q_3 | Z_1, Z_2, Z_3)$$

Расширенная марковская модель позволяет вычислять ПРВ выходных фазовых флуктуаций на последующем шаге через ПРВ на предыдущем шаге. Для этого выразим выходную фазу через входную фазу и фазовую ошибки

$$\varphi_k^{\text{ш.вых}} = \varphi_k^{\text{ш.вх}} - \varphi_k. \quad (15)$$

Проинтегрируем совместную ПРВ, получаемую из расширенного векторного уравнения Колмогорова–Чепмена, по двум первым коор-

динамам, используя уравнение (15):

$$\tilde{W}(\varphi^{\text{ВЫХ}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(\varphi, x, \varphi + \varphi^{\text{ВЫХ}}) d\varphi dx. \quad (16)$$

Это выражение позволяет определить ПРВ выходных фазовых флуктуаций и использовать ее в качестве ПРВ входного процесса для следующего звена. Однако, согласно рис. 3, на систему воздействует не фазовый, а частотный шум. Поэтому выходную фазу необходимо преобразовать в выходную частоту. Обозначим выходную частоту через  $\tilde{\eta}$  и найдем ПРВ выходной частоты на  $k$ -м шаге:

$$T\tilde{\eta}_k = \varphi_{k+1}^{\text{ВЫХ}} - \varphi_k^{\text{ВЫХ}}. \quad (17)$$

Совместная ПРВ координат системы в два соседних момента времени определяется выражением

$$\begin{aligned} \widehat{W}(\varphi_{k+1}, x_{k+1}, \varphi_{k+1}^{\text{Ш.ВХ}}, \varphi_k, x_k, \varphi_k^{\text{Ш.ВХ}}) = \\ = q(\varphi_{k+1}, x_{k+1}, \varphi_{k+1}^{\text{Ш.ВХ}} | \varphi_k, x_k, \varphi_k^{\text{Ш.ВХ}}) \cdot W(\varphi_k, x_k, \varphi_k^{\text{Ш.ВХ}}). \end{aligned} \quad (18)$$

Проинтегрируем выражение (18) по координатам  $\varphi$  и  $x$ :

$$\begin{aligned} \widehat{W}(\varphi_{k+1}^{\text{ВЫХ}}, \varphi_k^{\text{ВЫХ}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{W}(\varphi_{k+1}, x_{k+1}, \varphi_{k+1} + \\ + \varphi_{k+1}^{\text{ВЫХ}}, \varphi_k, x_k, \varphi_k + \varphi_k^{\text{ВЫХ}}) d\varphi_k d\varphi_{k+1} dx_k dx_{k+1}. \end{aligned} \quad (19)$$

Используя выражения (18) и (19), определяем ПРВ выходных частотных флуктуаций

$$W(T\tilde{\eta}_k) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\varphi_k^{\text{ВЫХ}} + T\tilde{\eta}_k, \varphi_k^{\text{ВЫХ}}) d\varphi_k^{\text{ВЫХ}}. \quad (20)$$

Выражения (17)–(20) позволяют вычислить ПРВ выходного частотного шума звена, используя ее в качестве ПРВ входного частотного шума для следующей ячейки. Зная параметры всех шумов, действующих на каждую ячейку, мы можем вычислить время до срыва в каждом звене цепи последовательно соединенных генераторов и выбрать параметры кольца оптимальными с точки зрения времени до срыва.

**Математическая модель цепи каскадно синхронизируемых генераторов.** Структурная схема цепи синхронизируемых генераторов

приведена на рис. 2. Рассмотрим следующую модель цепи [2]

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{k+1}(\vec{Q}_1) = \int_{\Lambda} \tilde{q}_1(\vec{Q}_1 | \vec{Z}_1) W_k(\vec{Z}_1) d\vec{Z}_1; \\ p_k(\varphi'_{\text{пр}1}) = \widehat{L}[W_k(\vec{Q}_1)]; \\ p_k(\eta_2) = \widehat{M}[W_k(\vec{Q}_1)]; \\ \dots = \dots \\ W_{k+1}(\vec{Q}_N) = \int_{\Lambda} \tilde{q}_N(\vec{Q}_N | \vec{Z}_N) W_k(\vec{Z}_N) d\vec{Z}_N; \\ p_k(\varphi'_{\text{пр}N}) = \widehat{L}[W_k(\vec{Q}_N)]; \\ p_k(\eta_{N+1}) = \widehat{M}[W_k(\vec{Q}_{N+1})]. \end{array} \right. \quad (21)$$

Здесь  $\vec{Q}_i$ ,  $\vec{Z}_i$  – векторы состояния  $i$ -го звена цепи;  $p_k(\varphi'_{\text{пр}i})$  – ПРВ выходной фазы  $i$ -го звена на  $k$ -м шаге;  $p_k(\eta_N)$  – ПРВ выходной частоты  $(N - 1)$ -го звена на  $k$ -м шаге. Оператор  $\widehat{L}$  представляет собой преобразования многомерной ПРВ, получаемой с помощью расширенного уравнения Колмогорова–Чепмена, в ПРВ выходной фазы, и определяется выражением (16). Оператор  $\widehat{M}$  преобразует многомерную ПРВ в ПРВ выходной частоты и определяется выражением (20).

Данная модель позволяет определять статистические характеристики выходных флуктуаций для любого звена цепи в произвольный момент времени.

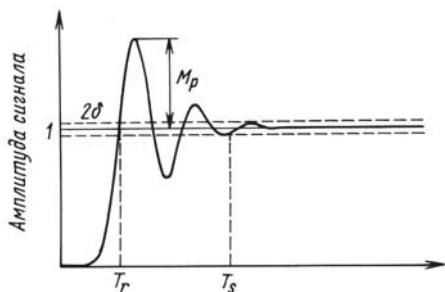
**Переходные процессы в цепи.** При различных переключениях генераторов в сети синхронизации в цепи могут возникать частотные и фазовые скачки. Крайне важно, чтобы система быстро отработывала их, входила в синхронизм за наименьшее время. Основные параметры переходных процессов приведены на рис. 4.

Входной процесс, содержащий скачки, является нестационарным, его математическое ожидание зависит от времени и описывается функцией включения:

$$W(\varphi_k^{\text{BX}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\varphi_k^{\text{BX}} - m(k))^2}{2\sigma^2}\right), \quad (22)$$

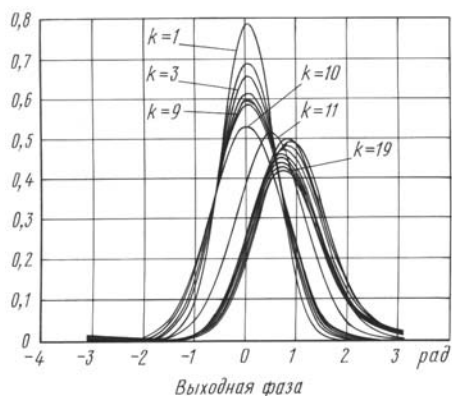
где  $m(k) = \begin{cases} 0, & k \leq k^*, \\ \phi_0, & k > k^*. \end{cases}$  Здесь  $\phi_0$  – значение фазового скачка;  $k^*$  – момент скачка.

Время установления ПРВ выходных флуктуаций, прошедшее с момента начала скачка, можно считать длительностью переходных процессов. На рис. 5 показана динамика изменения ПРВ выходной фазы при скачке входной фазы. В данном конкретном случае на десятом

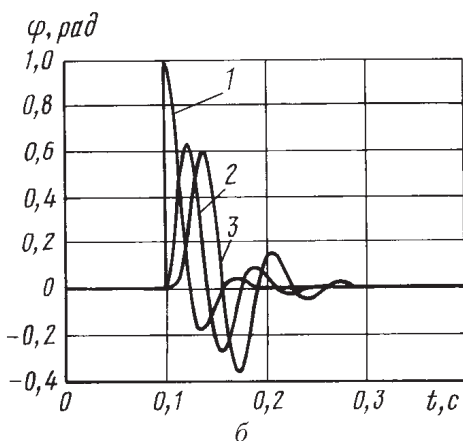
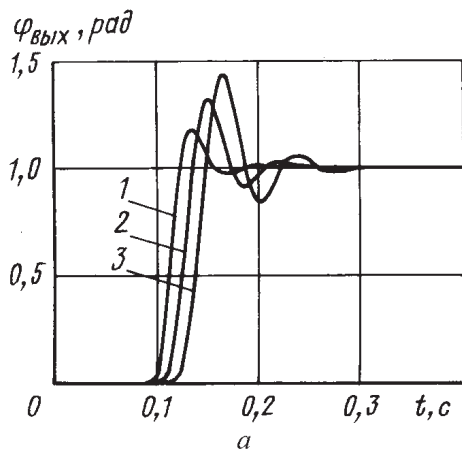


**Рис. 4. Параметры переходного процесса:**

$T_r$  — время нарастания фронта;  $T_s$  — время установления;  $M_p$  — максимальный выброс



**Рис. 5. Изменение ПРВ выходной фазы при скачке входной фазы**



**Рис. 6. Изменение во времени средней выходной фазы (а) и средней фазовой ошибки (б) различных элементов последовательной цепи при скачке фазы на входе:**

1, 2, 3 —  $M = 1; 2; 3$  соответственно

также происходит скачок входной фазы, заставляющий перестраиваться ПРВ выходных фазовых флуктуаций; примерно к двадцатому шагу перестройка заканчивается и переходной процесс можно считать завершенным.

На рис. 6, а, б показаны процессы на выходах элементов при скачке фазы на входе цепи. Видно, что с увеличением номера звена  $M$  последовательной структуры возрастают и длительность переходных процессов, и максимальный выброс.

В зависимости от параметров звеньев цепи переходные процессы имеют различный характер. Далее приведены зависимости характеристик переходных процессов от параметров колец. Так, на рис. 7 показана зависимость максимального выброса  $M_p$  от коэффициента усиления кольца  $D$ , на рис. 8 — от полосы среза петлевого фильтра.



Таким образом, увеличение значения коэффициента усиления кольца и улучшение фильтрующих свойств петлевого фильтра приводят к увеличению максимального выброса.

Зависимости длительности переходных процессов от коэффициента усиления кольца приведены на рис. 9. Согласно полученным результатам, можно судить о противоречивости поведения системы при изменении ее параметров: при увеличении коэффициента усиления уменьшается длительность переходных процессов, но растет максимальный выброс.

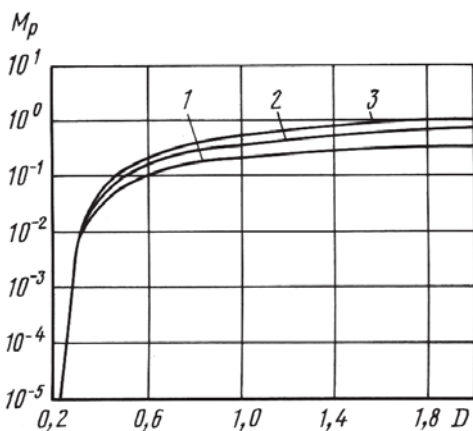


Рис. 7. Зависимость максимального выброса от коэффициента усиления кольца ФАПЧ ( $D$ ):

1, 2, 3 — см. рис. 6

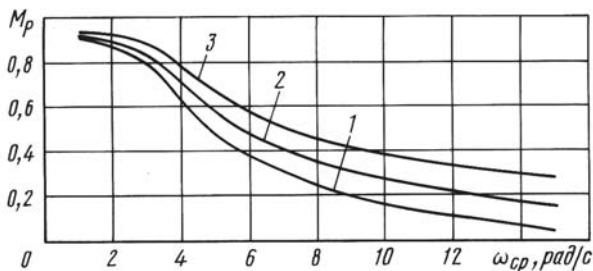


Рис. 8. Зависимость максимального выброса от полосы среза петлевого фильтра:

1, 2, 3 — см. рис. 6

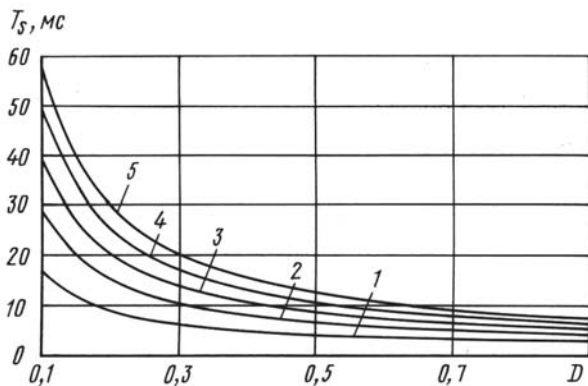


Рис. 9. Зависимость длительности переходных процессов от коэффициента усиления кольца:

1, 2, 3, 4, 5 —  $M = 1; 2; 3; 4; 5$  соответственно

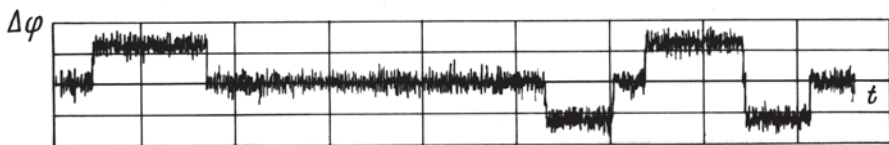


Рис. 10. Срыв слежения в системе ФАПЧ

**Срыв слежения.** Важным параметром СФС, находящихся в условиях шумовых воздействий, является срыв слежения, т.е. резкое изменение (скачок) фазовой ошибки на величину, кратную периоду характеристики ФД. Основная характеристика срыва — среднее время до срыва слежения, т.е. среднее время, за которое происходит изменение состояния системы за период. Срыв приводит к нарушению режима частотного слежения, поскольку вызывает появление частотного расогласования в среднем за некоторое время наблюдения. Скачок фазовой ошибки напрямую связан с шумовыми воздействиями на кольцо и носит случайный характер (рис. 10).

Формально задача определения среднего времени до срыва слежения сводится к задаче достижения за фиксированное число тактов заданных значений координат. На фазовой плоскости эти значения могут образовать некоторую кривую. Обычно же, для систем выше 2-го порядка и более задача решается с учетом ограничений на одну фазовую координату.

Рассмотрим этапы решения задачи определения среднего числа тактов, за которое система достигает некоторых заданных границ. Пусть  $\varphi_0 = 0$ , границы симметричны, их координаты  $\pm\varphi_L$ .

Вероятность нахождения внутри области  $[-\varphi_L; \varphi_L]$  фазовой ошибки определяется следующим образом:

$$W_k(\varphi) = \int_{-\varphi_L}^{\varphi_L} q(\varphi|z)W_{k-1}(z)dz. \quad (23)$$

Согласно выражению (23) вероятность того, что число тактов до достижения границы  $|\varphi_L|$  равняется  $k$ , определяется выражением [1]

$$P_k = \int_{-\varphi_L}^{\varphi_L} [W_{k-1}(\varphi) - W_k(\varphi)] d\varphi. \quad (24)$$

Для получения среднего числа тактов до достижения срыва необходимо провести усреднение:

$$\begin{aligned} N_{\text{ср}} &= \sum_{k=1}^{\infty} kP_k = \int_{-\varphi_L}^{\varphi_L} \sum_{k=1}^{\infty} k [W_{k-1}(\varphi) - W_k(\varphi)] d\varphi = \\ &= 1 + \int_{-\varphi_L}^{\varphi_L} \sum_{k=1}^{\infty} W_k(\varphi) d\varphi. \end{aligned} \quad (25)$$

На рис. 11, а приведены зависимости среднего времени до срыва слежения от коэффициента усиления идентичных колец цепи, функционирующих в условиях комбинированных воздействий (здесь и далее полагается, что тактовый период равен 1 мс). Из рисунка видно, что существует некоторый оптимальный коэффициент усиления, при котором время до срыва максимально.

Частотные и фазовые скачки приводят к снижению среднего времени до срыва слежения, что объясняется наличием переходных процессов в системе, которые увеличивают вероятность выхода фазовой ошибки за заданные границы.

Для нахождения длительности переходных процессов в системе можно пользоваться уравнением Колмогорова–Чепмена, считая ПРВ на входе нестационарной.

На рис. 11, б изображены зависимости среднего времени до срыва слежения от максимального выброса. Увеличение максимального

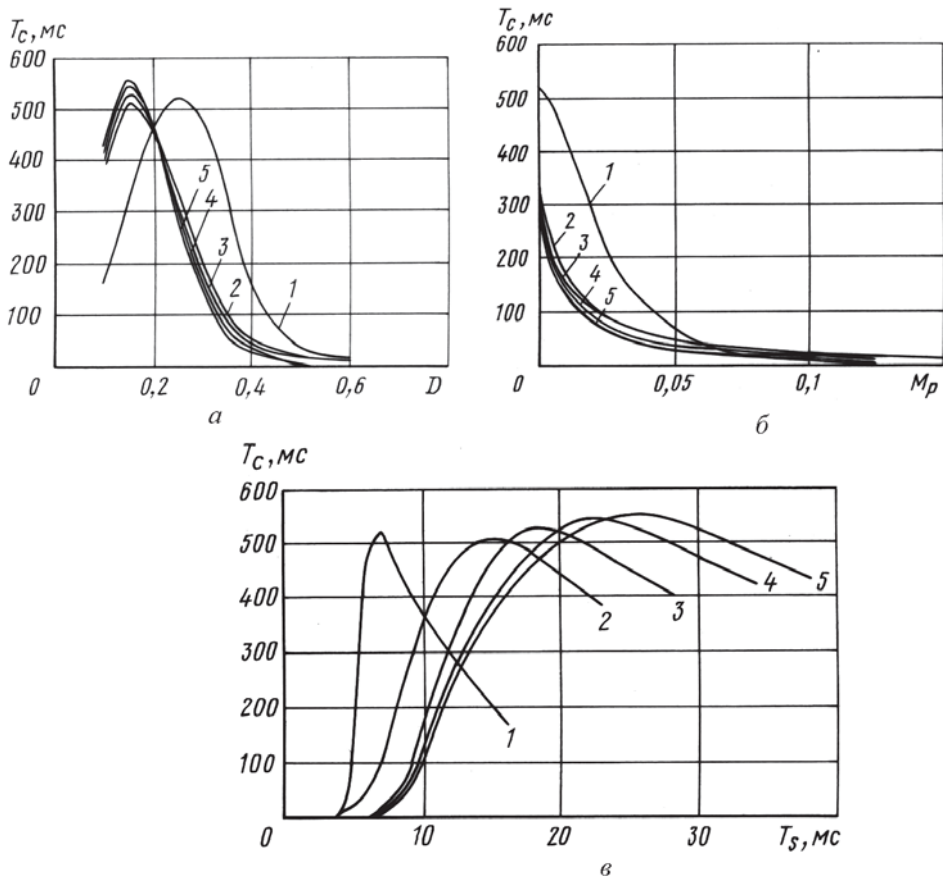


Рис. 11. Зависимость среднего времени до срыва слежения  $T_c$  от коэффициента усиления кольца (а); от величины максимального выброса (б); от длительности переходных процессов в кольце ФАПЧ (в):

1, 2, 3, 4, 5 –  $M = 1, 2, 3, 4, 5$  соответственно

выброса приближает систему к границам слежения, увеличивая тем самым вероятность срыва на данном шаге.

Зависимости среднего времени до срыва слежения от длительности переходных процессов представлены на рис. 11, в. Видно, что зависимости носят противоречивый характер. Уменьшение длительности переходных процессов приводит к увеличению числа срывов на определенном временном интервале. Наоборот, при максимальном времени до срыва слежения приходится “жертвовать” временем установления.

**Выводы.** Предложен метод, позволяющий исследовать динамические характеристики цепочечных структур колец ФАПЧ, функционирующих в условиях комбинированных шумовых воздействий. В качестве основного исследуемого параметра использовалось среднее время до срыва слежения, знание которого в синхронных цепях крайне важно для оценки качества работы системы. Приведенные результаты показывают противоречивый характер поведения системы для различных источников шумов. В связи с этим возникает оптимизационная задача, решение которой позволяет выбрать параметры звеньев цепи наилучшим образом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К а з а к о в Л. Н., Б а ш м а к о в М. В. Математические модели стохастических цифровых систем фазовой синхронизации. – Ярославль, 2001.
2. К а з а к о в Л. Н., Я к и м о в И. М. Оптимизация цепи последовательно синхронизируемых генераторов различных уровней // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. докл. 6-й междунар. конф., 31 марта – 2 апреля 2004 г. – Москва, 2004. – Т. 2. – С. 222–225.
3. Б р е н и С. Синхронизация цифровых сетей связи. – М.: Мир, 2003.

Статья поступила в редакцию 15.09.2006

А.А. Иванов — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области статистического моделирования нелинейных систем управления.

A.A. Ivanov — student of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of statistical simulation of nonlinear control systems.

В.Г. Шушков — студент Ярославльского государственного университета им. П.Г. Демидова. Специализируется в области исследования статистических характеристик систем синхронизации.

V.G. Shushkov — student of the Yaroslavl' State University n.a. P.G. Demidov. Specializes in the field of study of statistical characteristics of synchronization systems.